

На правах рукописи

ДЕНИСОВА Ольга Николаевна

**ОСОБЕННОСТИ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО
СОСТАВА РАСТЕНИЙ ПРИДОРОЖНОЙ ЗОНЫ
В УСЛОВИЯХ ОСТАТОЧНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ СВИНЦОМ**

03.00.16 – Экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

КАЗАНЬ–2006

Работа выполнена на кафедре химии ФГОУ ВПО Марийский государственный технический университет

Научный руководитель

доктор биологических наук, профессор
Винокурова Раиса Ибрагимовна

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор
Ившин Виктор Павлович

кандидат химических наук, доцент
Гоголь Эллина Владимировна

Ведущая организация

Институт экологии природных систем
Академии Наук Республики Татарстан
(г. Казань)

Защита диссертации состоится 19 сентября 2006 года в 14 ч. на заседании Диссертационного Совета Д 212.081.19 при Казанском государственном университете им. В.И. Ульянова-Ленина

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного университета им. В.И. Ульянова-Ленина

Отзыва на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями просим присылать по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, КГУ, отдел аспирантуры, тел/факс (843)238-76-01

Автореферат разослан 16 августа 2006 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета,
доктор химических наук, профессор

Г.А. Евтюгин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Проблема охраны окружающей среды в связи с возрастанием объема техногенных выбросов в атмосферу с каждым годом становится все более актуальной. Среди многочисленных источников атмосферного загрязнения выделяют стационарные (предприятия энергетики, металлургии, химической и нефтеперерабатывающей промышленности и др.) и мобильные, главным из которых является автомобильный транспорт (Лозановская, 1998). К началу XXI века численность мирового парка автомобилей достигла 500 млн.

С выхлопными газами в атмосферный воздух поступают токсичные оксид углерода (II), оксиды азота и серы, углеводороды и их производные, тяжелые металлы (Pb, Cd, Ni, Cr и др.) (Автомобильные дороги ..., 1999). Эмиссия Pb от автотранспорта в России резко сократилась в 2003 г., когда был установлен запрет на использование бензина, содержащего тетраалкилсвинец. Однако на протяжении длительного времени Pb, обладающий низкой мигрирующей способностью и большим периодом полуудаления, аккумулировался в почве и растительности вдоль автострад. В настоящее время он остается одним из главных загрязняющих компонентов придорожных экосистем.

Для защиты окружающей среды от выбросов автотранспорта наряду с техническими средствами и законодательными мерами все шире применяется метод, основанный на создании лесозащитных зон вблизи автомагистралей, вдоль которых образуются своеобразные биогеохимические аномалии. Установлено, что максимум загрязнения находится на высоте 1–2 м над уровнем земли (Добровольский, 1998). Накапливаясь преимущественно в вегетативных органах растений, свинец оказывает существенное влияние на их микроэлементный состав, ингибируя поступление в растения одних элементов и одновременно стимулируя накопление других, поскольку большинство микроэлементов являются биокатализаторами и регуляторами наиболее важных физиологических процессов (Лир, 1974; Школьник, 1974; Кабата-Пендиас, 1989; Полевой, 1989).

Лесные экосистемы, обладая значительными поглотительными возможностями, во многих случаях могут противостоять высоким уровням антропогенной нагрузки. При отсутствии внешних признаков угнетения индикацию состояния экосистемы можно проводить по содержанию микроэлементов в тканях растений, прежде всего в фотосинтезирующих органах, которые являются их активными накопителями (Мэннинг, Федер, 1985).

Целью данной работы является установление закономерностей накопления и особенностей распределения микроэлементов в компонентах придорожной лесной экосистемы и выявление информативных параметров электронного строения атомов химических элементов для прогноза интенсивности их поглощения фотосинтезирующими органами растений в условиях высокого остаточного содержания Pb.

Задачи исследования:

1. Определить содержание микроэлементов (Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, V, Zn) в почве и фотосинтезирующих органах основных древесных и травянистых растений придорожной экосистемы.

2. Выявить закономерности распределения микроэлементов в объектах придорожной экосистемы, установить индикационно значимые виды и органы растений для оценки уровня полиметаллического загрязнения.

3. Изучить особенности сезонной и возрастной динамики поглощения микроэлементов в системе почва – растение в условиях придорожной зоны и высокого остаточного содержания Pb.

4. Охарактеризовать интенсивность поглощения микроэлементов фотосинтезирующими органами растительных объектов в зависимости от параметров электронного строения атомов химических элементов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Общая характеристика закономерностей распределения и особенностей возрастной и сезонной динамики поглощения Pb и микроэлементов фотосинтезирующими органами растительных компонентов придорожной лесной экосистемы в условиях высокого остаточного содержания Pb.

2. Взаимосвязь биологического поглощения микроэлементов фотосинтезирующими органами растений придорожной зоны с параметрами электронного строения атомов и ионов соответствующих химических элементов.

Научная новизна. Впервые в условиях Республики Марий Эл на основе анализа микроэлементного состава проведена оценка уровня автотранспортного загрязнения придорожной экосистемы, выявлены особенности биоаккумуляции основных микроэлементов почвой и растениями в условиях преимущественного загрязнения свинцом. Проведена оценка информативности некоторых параметров электронного строения атомов химических элементов для

прогнозирования их поглощения фотосинтезирующими органами растений придорожной зоны.

Практическая значимость. Выявленный характер поглощения микроэлементов в почвенных и растительных объектах лесных придорожных экосистем позволит на практике проводить оценку их экологического состояния, а также использовать полученные данные при создании лесозащитных придорожных полос, при проектировании лесопитомников и сельхозугодий.

Отдельные разделы диссертационной работы используются при чтении общепрофессиональных и специальных курсов для студентов факультета лесного хозяйства и экологии и факультета природных и водных ресурсов МарГТУ.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены на Всероссийских междисциплинарных научных конференциях «Глобализация и проблемы национальной безопасности России в XXI веке» (Йошкар-Ола, 2003); «Мировоззрение современного общества в фокусе научного знания и практики» (Йошкар-Ола, 2004); «Химия и лес» (Йошкар-Ола, 2004, 2005); Межрегиональной научно-практической конференции для студентов и аспирантов «Исследования молодежи – экономике, производству, образованию» (Сыктывкар, 2004); Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы аграрной науки и пути их решения» (Ижевск, 2005); научных конференциях профессорско-преподавательского состава МарГТУ (Йошкар-Ола, 2004–2006); заседании кафедры химии МарГТУ (Йошкар-Ола, 2006), заседании кафедры прикладной экологии КГУ (Казань, 2006).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы и ее результатов полностью отражено в 10 научных работах автора.

Личное участие автора заключается в составлении программы исследований, отборе, обработке и количественном химическом анализе проб растительных и почвенных образцов, обобщении и обсуждении результатов и формулировании выводов.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста, состоит из введения, 3-х глав, выводов, приложений, содержит 41 таблицу и 21 рисунок. Список цитированной литературы включает 175 наименований, в том числе 31 – иностранных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ И ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ

(Обзор литературы)

В обзоре литературы дана общая характеристика микроэлементов, рассмотрены основные источники их поступления в окружающую среду. Показана физиологическая роль микроэлементов в растительных организмах, их токсичность и возможность детоксикации. Обобщены факторы, определяющие элементный химический состав растений. Рассмотрены вопросы взаимного влияния, синергизма и антагонизма химических элементов в процессе вегетации растений. Дана характеристика параметров электронного строения атомов химических элементов, используемых при решении прикладных экологических задач.

Анализ литературных данных показал, что вопрос микроэлементного состава растительности в естественных и техногенных экосистемах изучается достаточно активно. Неизменный интерес вызывает вопрос о взаимодействии и взаимовлиянии микроэлементов в растительных организмах (Алексеева-Попова, 1991; Беляева, 2003; Улахович, 1997; Godzik, 1993; Stronski, 1999) и их функциональном значении для растений (Алексеев, 1987; Серегин, 2001; Юдинцева, 1985 и др.).

Техногенное внесение микроэлементов в окружающую среду является самостоятельной экологической проблемой. Микроэлементный состав фотосинтезирующих органов определяется преимущественно экологическим фактором (Ильин, 1985). В связи с этим неуклонно возрастает внимание к вопросам количественного содержания микроэлементов в различных компонентах экосистем, определения фоновых и токсических концентраций техногенных поллютантов, экологического нормирования (Биогеохимические основы..., 1993; Второва 1992, 1993, 1994, 1999, 2003, 2004; Роль растений елово-пихтовых..., 2002; Черненко, 2004).

Значительное внимание уделяется проблеме влияния автотранспорта на экологическое состояние придорожных экосистем и поиску информативных биоиндикаторов данного вида азротехногенного загрязнения (Автомобильные дороги..., 1999; Бабенко, 2003; Воробейчик, 1991, 1993; Влияние кадмия ..., 2005; Влияние свинца..., 2004; Доклад о свинцовом загрязнении ..., 1997; Лысиков, 1996, 2005).

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования выбраны придорожные лесные экосистемы, представленные естественными елово-пихтовыми фитоценозами вдоль линейного источника загрязнения на примере автомагистрали Йошкар-Ола – Казань.

Полевые исследования и отбор образцов для анализа проводили на заложенных в 2003 году пробных площадях с преобладающими видами древесных растений различных ярусов: растений подроста пихты сибирской (*Abies sibirica* L.), деревьев и подроста ели обыкновенной (*Picea abies* L.), березы повислой (*Betula pendula* Roth.), осины (*Populus tremula* L.), а также травянистых растений: копытня европейского (*Asarum europaeum* L.), сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria* L.) на удалении до 100 м от автомагистрали.

Для сравнительной оценки уровня загрязнения придорожной зоны проведен отбор и анализ проб соответствующих видов растительных образцов на условно фоновой территории - пробной площади, заложенной в 1999 году сотрудниками кафедры химии МарГТУ.

Отбор проб проводили в соответствии с ГОСТ 17-4-4.02.84 в течение всего сезона вегетации с интервалом 2 недели. Почвенные образцы отбирали в местах отбора растительных проб.

Образцы хвои разделяли на хвою текущего, второго и третьего годов, травы – на стебли, листья и корни.

Растительные и почвенные образцы сушили до воздушно-сухого, затем при 105°C доводили до абсолютно сухого состояния. Образцы хвои, травы, листьев озоляли в муфельной печи при 450°C. Для пересчета на абсолютно сухую массу определяли зольность образцов.

Количественный химический анализ содержания микроэлементов (Pb, Mn, Mo, Zn, Co, Cu, Cr, B, Ba, Be, V, Ag, Ni, Cd, As) в образцах почвы и золы растений осуществляли методом атомно-эмиссионной спектроскопии в аккредитованной лаборатории экологического контроля Казанского государственного университета по методикам, рекомендованным для целей государственного экологического контроля. Планируемое количество измерений и анализов позволило обеспечить не менее чем 5%-ный уровень значимости.

Обработку экспериментальных данных проводили с использованием табличного процессора Microsoft Excel, статистических пакетов Statistica 6.0, Curve expert 1.3 методами корреляционного, регрессионного, однофакторного и двухфакторного дисперсионного анализа.

О достоверности оценок судили по значению критерия Фишера (Лакин, 1990; Жигунов и др., 2002; Макарова, 2002; Самсонова и др., 2005).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Характер и закономерности распределения свинца в объектах придорожной экосистемы

При анализе экспериментальных данных выявлена локализация Pb в поверхностном слое почвы придорожной зоны, связанная с накоплением в этом слое органического вещества, являющегося эффективным аккумулятором и утилизатором свинцового загрязнения.

Содержание Pb в почвенном горизонте A0 (глубина 0–10 см) превышает его фоновый уровень для почвы Республики Марий Эл (РМЭ) в 1,4 раза (Роль растений елово-пихтовых..., 2002). На глубине 20–30 см (горизонт A1B) превышения фонового уровня по содержанию Pb в почве не наблюдается.

Среднее содержание Pb в фотосинтезирующих органах изученных древесных и травянистых растений придорожной зоны многократно превышает известные фоновые уровни: в хвое пихты сибирской – от 3-х до 6 раз (в отдельных пробах имеет место 25-кратное превышение фоновых параметров), в хвое ели обыкновенной – от 1,5 до 2,5 раз (в отдельных пробах до 15 раз), копытня европейского – от 1,3 до 1,8 раз (в отдельных пробах до 6 раз).

Данные по фоновым уровням содержания Pb в листьях березы повислой и осины для подобных фитоценозов отсутствуют.

Содержание Pb в образцах сныти обыкновенной на исследуемой и контрольной фоновой территории достоверно не различаются, что свидетельствует о низкой чувствительности растений данного вида к свинцовому загрязнению. При сравнении содержания Pb в надземной части растений копытня европейского и сныти обыкновенной с содержанием в корнях выявлено, что для обоих изученных видов трав в условиях остаточного свинцового загрязнения нарушается закономерность акропетального распределения Pb. Поглощение Pb надземными органами копытня европейского в 1,9 раза выше, чем сныти обыкновенной, что объясняется видовыми анатомическими особенностями этих растений (Серегин, 2001).

Для изученных видов хвойных растений установлено, что содержание Pb возрастает с увеличением возраста хвои (рис.1). Аналогичная тенденция прослеживается и для растений хвойного подроста на фоновых территориях.

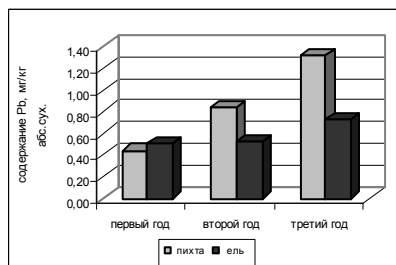


Рис.1. Сравнительное содержание Pb в хвое разных лет вегетации растений подроста пихты сибирской и ели обыкновенной

По уменьшению содержания свинца в абсолютно сухом веществе все исследованные растения располагаются в следующий ряд:

Копытень европейский > Сныть обыкновенная >

> Осина > Береза повислая >

> Ель обыкновенная (деревья) >

> Пихта сибирская (подрост) > Ель обыкновенная (подрост)

Результаты дисперсионного анализа свидетельствуют о статистической достоверности зависимости изменения содержания свинца (C_{Pb} , мг/кг абс.сух.) в почвенном горизонте A0 от расстояния до автодороги (R , м), для описания которой выбрана математическая модель:

$$C_{Pb} = a \cdot R^{(b-1)} \cdot \exp(-c \cdot R) + d. \quad (1)$$

Графическое изображение данной модели для поверхностного горизонта почвы показано на рис.2. Значения максимальной относительной погрешности модели (Δ_{\max} , %) и коэффициента детерминации (R^2) составляют 13,19 % и 0,66 соответственно.

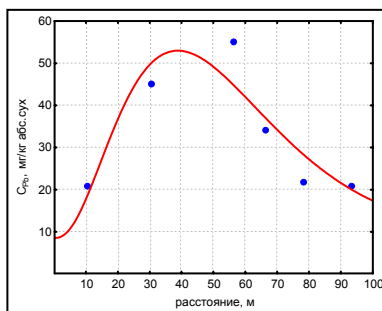


Рис.2. Зависимость содержания свинца в почвенном горизонте A0 от расстояния до автодороги

Зависимость содержания Pb в фотосинтезирующих органах растений придорожной зоны от расстояния до автодороги, которая прослеживается в хвое второго и третьего годов подроста пихты сибирской и ели обыкновенной и в надземных органах копытня европейского, также описывается уравнением (1).

Графический вид полученных зависимостей (рис.3) позволяет сделать заключение о симбатном характере связи между содержанием Pb в почве и фотосинтезирующих органах растительных тест-объектов придорожной экосистемы.

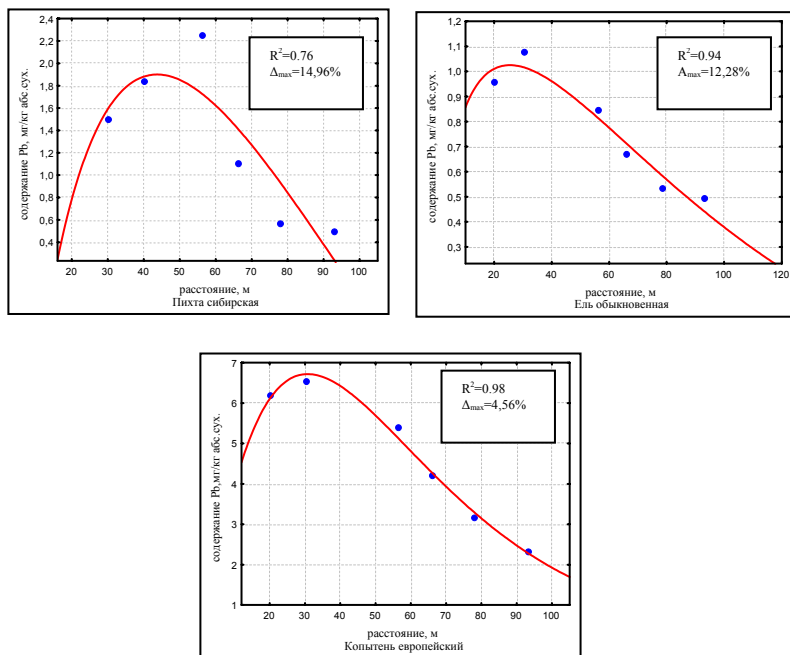


Рис.3. Зависимость содержания Pb в фотосинтезирующих органах растительных объектов от расстояния до автодороги

Параметры математических моделей и значения коэффициентов детерминации приведены в табл. 1.

На основании модели (1) определено расстояние от автодороги, на котором содержание Pb в многолетней хвое снижается до фонового уровня. Для растений подроста пихты оно составляет 93 м, для ели – 115 м от асфальтового полотна.

Таблица 1

Параметры моделей зависимости содержания Pb в объектах придорожной экосистемы от расстояния до автодороги

| Объект | a | b | c | d | R ² |
|----------------------|--------|-------|--------|--------|----------------|
| Почва | 0,0494 | 3,559 | 0,0660 | 8,522 | 0,66 |
| Пихта сибирская | 1,150 | 1,674 | 0,0154 | -5,578 | 0,76 |
| Ель обыкновенная | 0,585 | 1,394 | 0,0155 | -0,383 | 0,94 |
| Копытень европейский | 0,347 | 2,213 | 0,0394 | 0,126 | 0,99 |

В хвое текущего года вегетации обоих изученных видов растений зависимость содержания Pb от расстояния не выявлена.

Сезонная динамика поглощения Pb фотосинтезирующими органами всех изученных растительных тест-объектов имеет барьерный характер. На рисунке 4 приведено графическое изображение характера сезонной динамики поглощения Pb листьями березы повислой ($\Delta_{\max} = 14,81\%$; $R^2=0,69$).

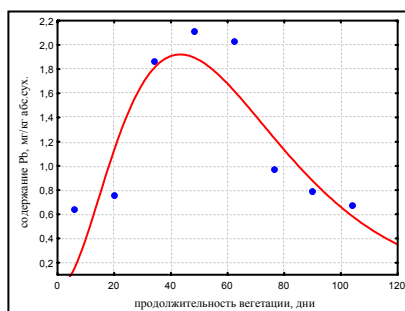


Рис.4. Сезонная динамика поглощения Pb листьями березы повислой

3.2. Характер и закономерности распределения микроэлементов в объектах придорожной экосистемы

При определении микроэлементного состава почвенных образцов выявлен регрессивно-аккумулятивный путь распределения микроэлементов в почвенном профиле, характерный для техногенных территорий и проявляющийся в накоплении Pb, Zn, As, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni и V в верхнем горизонте почвы и понижении их содержания в нижележащих горизонтах.

Содержание большинства микроэлементов в почве Ag, As, Co, Cr, Cu, Mn и Mo находится на уровне фона. Содержание микроэлементов

Ba, Be и Ni незначительно превышает фоновый уровень, содержание Zn, В и V не достигает фоновых значений.

Сравнительная характеристика содержания микроэлементов в фотосинтезирующих органах хвойных растений с фоновыми значениями (Роль растений елово-пихтовых..., 2002) приведена в табл.2.

Таблица 2

Распределение микроэлементов в хвое

| Вид | Возраст хвои | Содержание микроэлементов | | |
|----------------------------|--------------|----------------------------------|-------------------|----------------------|
| | | выше фонового уровня | на фоновом уровне | ниже фонового уровня |
| Пихта сибирская (подрост) | 1-й год | B, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb | Ba, V | Ag, Mn, Zn |
| | 2-й год | B, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, V, Pb | Ba | Ag, Cu, Mn, Zn |
| | 3-й год | B, Be, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, V, Pb | Ba | Ag, Cu, Mn, Zn |
| Ель обыкновенная (подрост) | 1-й год | B, Co, Cr, Mo, Ni, Pb | Ba | Ag, Cu, Mn, Zn, V |
| | 2-й год | B, Be, Co, Cr, Mo, Ni, Pb | Ba, | Ag, Cu Mn, Zn, V |
| | 3-й год | B, Be, Pb, Co, Cr, Mo Ni, V | Ba | Ag, Cu, Mn, Zn |
| Ель обыкновенная (деревья) | 1-й год | B, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb | Ba, | Ag, Co, Mn, V, Zn |
| | 2-й год | Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn | Ba | Ag, B, Co, Mn |
| | 3-й год | Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn | Ba | Ag, B, Co, Mn |

Данные по фоновым содержаниям микроэлементов в листьях изученных лиственных пород и травянистых растений, произрастающих в сходных лесорастительных условиях РМЭ отсутствуют.

В хвое растений подроста пихты сибирской и ели обыкновенной наблюдается ингибирование поглощения Ag, Cu, Mn и Zn. В хвое деревьев ели обыкновенной, кроме того наблюдается пониженное содержание B и Co.

Микроэлементы, содержание которых в фотосинтезирующих органах хвойных растений придорожной зоны выше фонового уровня, можно разделить на 2 группы:

1) микроэлементы, относящиеся к группе техногенных: Cr, Ni, Cd, Be, концентрирующиеся в объектах техногенных ландшафтов. Известно, что избыточному содержанию одного из них, как правило, сопутствует и избыточное содержание остальных (Содержание тяжелых металлов..., 1993). Для данных микроэлементов характерен барьерный тип сезонной аккумуляции;

2) физиологически значимые микроэлементы: B, Mo, Co, Cu, повышенное содержание которых можно расценивать как адаптивную реакцию фотосинтезирующих органов растений на высокий уровень загрязнения Pb. Для этих микроэлементов характерно наличие безбарьерного типа сезонного накопления.

На рис. 5 на примере хвои третьего года пихты сибирской показан характер относительного накопления микроэлементов с разным типом аккумуляции.

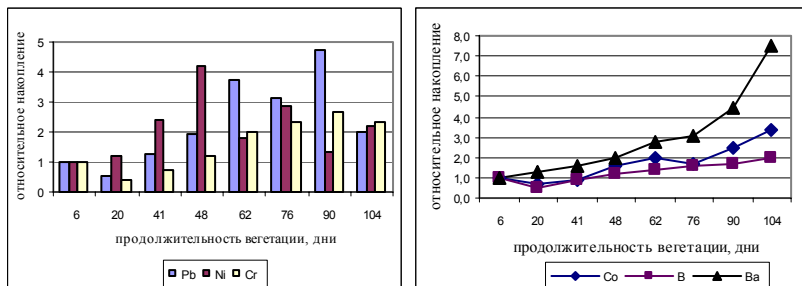


Рис. 5. Характер сезонного поглощения микроэлементов на примере хвои третьего года хвои пихты сибирской

Наблюдается тесная корреляционная взаимосвязь сезонного поглощения Ni, Cr, имеющего барьерный характер, с поглощением Pb. Значения коэффициентов корреляции приведены в табл.3.

Таблица 3

Корреляционная взаимосвязь сезонной аккумуляции микроэлементов в хвое пихты сибирской

| | Pb | Ni | Cr | Co | B | Ba |
|----|------|------|------|------|------|----|
| Pb | 1 | | | | | |
| Ni | 0,53 | 1 | | | | |
| Cr | 0,86 | 0,06 | 1 | | | |
| Co | 0,28 | 0,08 | 0,85 | 1 | | |
| B | 0,18 | 0,19 | 0,94 | 0,93 | 1 | |
| Ba | 0,23 | 0,03 | 0,77 | 0,96 | 0,87 | 1 |

Взаимозависимость характера сезонной динамики накопления Co, B и Ba с сезонной аккумуляцией свинца выражена слабо.

Однако обнаружена весьма высокая корреляционная взаимосвязь их накопления между собой (табл. 3).

Следует отметить, что микроэлементы Co, B, Ba в фоновых условиях РМЭ по известным в литературе данным (Силкина, 2006) имеют барьерный тип аккумуляции.

Выявлены статистически достоверные различия в абсолютном содержании микроэлементов в хвое разных лет вегетации обоих изученных видов (табл. 4):

Таблица 4

Распределение микроэлементов в хвое исследованных видов
по содержанию (мг/кг абс.сух.) в хвое

| Вид | Накопление микроэлементов в хвое | | |
|------------------|----------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| | первого года | второго года | третьего года |
| Пихта сибирская | Ag, B, Co, Cu, Mo | Ni | Ba, Be, Cr, Mn, Pb, V, Zn |
| Ель обыкновенная | B, Co, Cu, Mo | – | Ag, Ba, Be, Cr, Mn, Ni, Pb, V, Zn |

Наибольшее содержание B, Co, Cu и Mo обнаружено в хвое текущего года растений подроста обоих видов. Максимальное содержание Ni наблюдается в хвое второго года пихты сибирской. Большинство микроэлементов накапливается в хвое третьего года растений подроста обоих видов.

Поглощение микроэлементов Pb, Ba, Be, Cr, Mn, Ni и V в хвое растений подроста пихты сибирской усиливается с увеличением возраста хвои, содержание Ag, B, Co и Cu – уменьшается, а содержание Mo и Zn практически не изменяется.

В хвое растений подроста ели обыкновенной с увеличением возраста хвои увеличивается содержание Pb, Ag, Ba, Be, Co, Cr, Mn, Ni, V и Zn и уменьшается содержание B, Cu и Mo.

Обобщенным показателем интенсивности техногенной нагрузки на экосистемы является суммарный показатель загрязнения (СПЗ), используемый для оценки степени накопления загрязнителей в окружающей среде. На основании экспериментальных данных о содержании химических элементов в фотосинтезирующих органах растений проведен расчет СПЗ для изучаемой придорожной экосистемы по формуле:

$$СПЗ = \sum C_i / C_{\text{фи}},$$

где C_i – содержание i -того элемента в растительном образце, мг/кг абс. сух.;

$C_{\text{фи}}$ – его фоновое содержание в растениях, мг/кг абс. сух.

Рассчитанные значения СПЗ для различных тест-объектов придорожной экосистемы и для проб хвои контрольных растений подраста пихты сибирской и ели обыкновенной, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения суммарного показателя загрязнения (СПЗ) тестовых видов растений придорожной экосистемы и контрольной территории

| Тестовые виды | СПЗ |
|--|-------|
| Пихта сибирская подрост | 34,16 |
| Пихта сибирская подрост (<i>контроль</i>) | 8,52 |
| Ель обыкновенная подрост | 20,32 |
| Ель обыкновенная подрост (<i>контроль</i>) | 13,84 |
| Ель обыкновенная деревья | 60,25 |
| Береза повислая | 19,55 |
| Осина | 20,18 |
| Копытень европейский | 18,22 |
| Сныть обыкновенная | 15,82 |

Хвоя пихты сибирской в придорожной зоне концентрирует микроэлементы в 4,2 раза, хвоя ели обыкновенной – в 1,5 раза интенсивнее, чем хвоя этих пород на контрольной территории.

Наиболее загрязненным тест-объектом исследуемой экосистемы являются взрослые деревья вида ель обыкновенная.

Кумулятивная нагрузка тяжелых металлов на придорожную экосистему является подтверждением существенного влияния автотранспортного загрязнения на компоненты придорожной экосистемы и позволяет классифицировать изучаемую экосистему как загрязненную.

3.3. Зависимость биологического поглощения микроэлементов от параметров электронного строения атомов и ионов

Различная физиологическая роль микроэлементов в растениях, особенности электронного строения атомов и ионов определяют разную интенсивность их поглощения. Различный характер миграции катионогенных (Pb, Ag, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Zn) и анионогенных (As, B, Be, Cr, Mo, V) микроэлементов в системе

почва-растение отмечен рядом исследователей (Перельман, 1979; Роль растений елово- пихтовых..., 2002).

Биогеохимическую специализацию растений наглядно выражают ряды изменения интенсивности поглощения микроэлементов (коэффициенты биологического поглощения, КБП), приведенные в табл. 6. Все изученные растения накапливают преимущественно катионогенные микроэлементы, т.е. являются катионофитными. Значительные величины КБП характерны для микроэлементов-поллютантов (Cd, Ni, Pb).

Таблица 6

Ряды интенсивности биологического поглощения микроэлементов изученными растениями

| Вид | Микроэлементы | |
|--|--------------------------------|---------------------|
| | катионогенные | анионогенные |
| Пихта сибирская подрост | Cd>Pb>Cu>Zn>Ag>Ba>Mn >Ni>Co | Mo>B>Be≈ Cr>V |
| Пихта сибирская подрост (контроль) | Ni>Ba>Zn>Cu>Pb>Mn>Co | Mo>B>Be> Cr>V |
| Ель обыкновенная подрост | Cd>Cu>Zn>Pb>Ba>Ag>Ni> Mn>Co | B>Mo>As> Cr>Be>V |
| Ель обыкновенная подрост (контроль) | Ba>Mn>Co>Pb>Cu>Zn>Ni | Be>Mo>B> Cr>V |
| Ель обыкновенная деревья | Cd>Zn>Cu>Ag>Ni>Ba> Pb>Mn>Co | B>Mo>As> Be>Cr>V |
| Береза повислая | Zn>Cu>Cd>Pb>Ba>Ag>Ni> Mn>Co | B>Mo>Be> Cr>V |
| Осина | Zn>Cu>Cd>Pb>Ba>Ag>Co >Ni>Mn | B>As>Mo> Be>Cr>V |
| Копытень европейский | Ni>Cu>Pb>Zn>Ba>Ag>Mn >Cd>Co | B>Mo>Be> Cr>V>As |
| Сныть обыкновенная | Zn>Ni>Cd>Cu>Ba>Pb> Ag>Co>Mn | Mo>As>B> Be>Cr>V |

Общие тенденции накопления микроэлементов растениями выявляются с помощью коэффициентов биогеохимической активности ($K_{БХА}$), предложенных А.Д. Айвазян (1974) и рассчитываемых отношением суммы коэффициентов биологического поглощения к числу суммированных элементов.

Рассчитанные значения коэффициентов биогеохимической активности фотосинтезирующих органов исследованных видов

растений ($K_{БХА} = \sum \text{КБП (Pb, Zn, Ag, Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Ni)}/9$) приведены в табл. 7.

Значения коэффициентов биогеохимической активности фотосинтезирующих органов растений придорожной зоны существенно выше по сравнению с растениями аналогичных видов контрольных территорий, что связано с накоплением в них значительного количества поллютантов и усилением аккумуляции ряда физиологически значимых микроэлементов (табл. 7).

Таблица 7

Коэффициенты биогеохимической активности
исследованных растительных объектов

| Вид | $K_{БХА}$ | |
|--------------------------|-----------|----------|
| | Опыт | Контроль |
| Пихта сибирская подрост | 2,31 | 0,70 |
| Ель обыкновенная подрост | 2,56 | 1,60 |
| Копытень европейский | 1,00 | 0,82 |
| Сныть обыкновенная | 1,40 | 0,81 |
| Береза повислая | 1,52 | — |
| Осина | 2,29 | — |

Представляло интерес связать данные по биологическому поглощению микроэлементов с геохимическими показателями соответствующих ионов.

Для выявления влияния природы химических элементов на интенсивность их поглощения фотосинтезирующими органами растений проведен анализ зависимости величины КБП от таких характеристик строения атомов исследуемых элементов, как радиус ионов (R_i), энергетический коэффициент (ЭК), ионный потенциал (IP).

Известно, что значительная часть поглощенных микроэлементов не только попадает в растения в ионном виде, но и распределяется в них в соответствии с особенностями химического строения их атомов и ионов (Алексеев, 2000; Добровольский, 1998).

Для исследуемых катионогенных микроэлементов наблюдается достоверное увеличение интенсивности поглощения элемента фотосинтезирующими органами растений с возрастанием ионного радиуса, обнаружена линейная зависимость КБП – R_i . Соответствующие уравнения регрессии приведены в табл. 8.

Полученные в данной работе результаты позволили выявить и количественно описать снижение интенсивности поглощения катионогенных микроэлементов с ростом ЭК для растений придорожной зоны (табл.9), что согласуется с мнением В.А. Алексеенко (2000).

Таблица 8

Зависимость КБП от радиуса (R_i , $\overset{\circ}{A}$) катионогенных элементов

| Вид растения | Уравнение регрессии | r | F |
|--|---------------------------|------|-------|
| Пихта сибирская подрост | $КБП = -2,15 + 3,53 R_i$ | 0,51 | 6,89 |
| Пихта сибирская подрост (контроль) | $КБП = 0,77 + 0,32 R_i$ | 0,54 | 8,06 |
| Ель обыкновенная подрост | $КБП = -0,19 + 1,02 R_i$ | 0,60 | 7,44 |
| Ель обыкновенная деревья | $КБП = -1,1 + 2,22 R_i$ | 0,93 | 11,47 |
| Ель обыкновенная подрост (контроль) | $КБП = -0,65 + 1,48 R_i$ | 0,52 | 6,02 |
| Береза повислая | $КБП = -0,60 + 1,04 R_i$ | 0,75 | 7,56 |
| Осина | $КБП = -0,68 + 1,50 R_i$ | 0,70 | 13,34 |
| Копытень европейский | $КБП = -0,045 + 1,05 R_i$ | 0,88 | 8,23 |
| Сныть обыкновенная | $КБП = -1,05 + 0,68 R_i$ | 0,69 | 5,97 |

Таблица 9

Зависимость КБП катионогенных микроэлементов от энергетических коэффициентов (ЭК) ионов

| Вид растения | Уравнение регрессии | r | F |
|--------------------------|-------------------------|------|-------|
| Пихта сибирская подрост | $КБП = 5,68 - 2,66 ЭК$ | 0,62 | 6,91 |
| Ель обыкновенная деревья | $КБП = 5,08 - 2,34 ЭК$ | 0,97 | 10,66 |
| Ель обыкновенная подрост | $КБП = 8,41 - 4,22 ЭК$ | 0,58 | 5,83 |
| Береза повислая | $КБП = 8,4 - 4,47 ЭК$ | 0,80 | 9,24 |
| Осина | $КБП = 13,23 - 6,63 ЭК$ | 0,69 | 7,37 |
| Копытень европейский | $КБП = 7,66 - 3,80 ЭК$ | 0,61 | 7,11 |
| Сныть обыкновенная | $КБП = 3,83 - 1,60 ЭК$ | 0,76 | 8,06 |

Известно, что поглощение элементов растениями определяется величиной ионного потенциала (потенциала Картледжа, IP), который характеризует плотность заряда на поверхности иона и степень его гидратируемости, следовательно, и доступности растениям (Добровольский, 1998).

При сравнении характера зависимости КБП от ионного потенциала атомов химических элементов в хвое растений подроста

изученных видов в условиях придорожной зоны и на контрольной территории установлено, что на контрольной территории интенсивность поглощения катионогенных химических элементов находится в статистически достоверной обратной зависимости от величины IP (рис. 6).

Характер зависимости интенсивности поглощения катионогенных химических элементов от величины ионного потенциала описывается уравнениями:

для подроста пихты сибирской $\text{КБП} = 1,69 - 0,68 \text{ IP}; r=0,80;$
 для подроста ели обыкновенной $\text{КБП} = 1,40 - 0,18 \text{ IP}; r=0,56.$

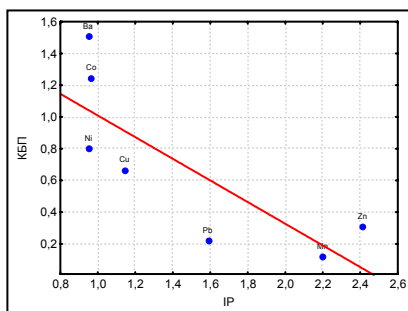


Рис.6. Зависимость поглощения катионогенных химических элементов от ионного потенциала для хвои подроста пихты сибирской (контроль)

Для хвои растений придорожной зоны подобная зависимость не является достоверной, вероятно, она осложнена воздействием автотранспортного загрязнения и нарушается вследствие наложения техногенной аккумуляции химических элементов на биогенную.

ВЫВОДЫ

1. Установлены общие закономерности распределения Pb и других микроэлементов почве и фотосинтезирующих органах деревьев и растений придорожной зоны в зависимости от расстояния до автодороги в возрастной и сезонной динамике. Большинство микроэлементов накапливается в хвое третьего года растений подроста пихты сибирской и ели обыкновенной.

Наибольшее содержание В, Со, Сu, Мо обнаружено в хвое текущего года растений подроста обоих видов. Максимальное содержание Ni наблюдается в хвое второго года пихты сибирской.

2. Выявлено, что уровень свинцового загрязнения поверхностного слоя почвы и хвои является высоким. Сезонная динамика накопления свинца фотосинтезирующими органами растений имеет барьерный характер. По уменьшению содержания свинца растения придорожной зоны располагаются в следующий ряд:

Копытень европейский > Сныть обыкновенная > Осина >

Береза повислая > Ель обыкновенная (деревья) >

Пихта сибирская (подрост) > Ель обыкновенная (подрост)

3. Установлено, что поглощение Pb в почве и фотосинтезирующих органах растений придорожной зоны описывается общей математической моделью:

$$C_{Pb} = a \cdot R^{(b-1)} \cdot \exp(-cR) + d,$$

где C_{Pb} – содержание свинца, мг/кг абс. сух.;

R – расстояние до автодороги, м.

Содержание Pb в хвое растений снижается до фонового уровня на расстоянии 93 м от автодороги для растений подроста пихты сибирской и 115 м – для ели обыкновенной.

4. Микроэлементы Pb, В, Ве, Cd, Cr, Мо, Ni и V, содержание которых в фотосинтезирующих органах растений придорожной зоны превышает фоновые значения, можно разделить на 2 группы:

– Cr, Ni, Cd и Ве, относящиеся к техногенным поллютантам и имеющие барьерный тип сезонной аккумуляции;

– В, Мо, Со и Сu, для которых характерно наличие безбарьерного типа сезонной аккумуляции. Повышенное содержание данных физиологически значимых микроэлементов в фотосинтезирующих органах растений можно расценивать как ответную адаптивную реакцию на высокий уровень автотранспортного загрязнения.

5. Рассчитанные коэффициенты биологического поглощения и величина суммарного показателя загрязнения позволяют классифицировать изученную придорожную экосистему как загрязненную и использовать хвою изученных видов, листья березы повислой и осины, а также надземные органы копытня европейского в качестве индикационно значимых объектов для оценки общего уровня остаточного загрязнения свинцом придорожных экосистем.

6. Коэффициенты биогеохимической активности катионогенных микроэлементов в фотосинтезирующих органах растений придорожной зоны существенно выше по сравнению с соответствующими коэффициентами для растений фоновых территорий, что объясняется повышенной интенсивностью биологического поглощения техногенных микроэлементов.

7. Выявлена достоверная линейная зависимость ($P > 0,05$) интенсивности биологического поглощения катионогенных химических элементов от некоторых параметров электронного строения их атомов (ионного радиуса, величины энергетических коэффициентов соответствующих ионов, величины ионного потенциала), позволяющая прогнозировать интенсивность поглощения техногенных микроэлементов фотосинтезирующими органами растений придорожных экосистем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Денисова, О.Н. К вопросу изучения роли растений в миграции тяжелых металлов / О.Н. Денисова, Н.Д. Акмолина // Седьмые Вавиловские чтения. Глобализация и проблемы национальной безопасности России в XXI веке: материалы постоянно действующей Всерос. междисциплинарной науч. конф. Ч.2.– Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003.–С.93-94.

2. Химический анализ объектов окружающей среды: Лабораторный практикум для студентов специальностей: 320600, 320700./ О.В. Андриянова, Р.И. Винокурова, О.Н.Денисова, Е.В. Тарасенко – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003.–72 с.

3. Денисова, О.Н. Аккумуляция тяжелых металлов фотосинтезирующими органами хвойных растений / О.Н. Денисова, Н.Д. Акмолина // Химия и лес: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. – С.26-28.

4. Денисова, О.Н. О возможности оценки экологического состояния придорожных экосистем на основании определения содержания тяжелых металлов в фотосинтезирующих органах пихты сибирской / О.Н. Денисова // Исследования молодежи – экономике, производству, образованию: Межрегиональная науч.-практ. конф. Т.2.–Сыктывкар: Сыктывкарский лесной институт, 2004.– С.10-12.

5. Денисова, О.Н. Сравнительное изучение содержания свинца в хвое ели обыкновенной и пихты сибирской / О.Н. Денисова, Н.Д. Акмолина // Восьмые Вавиловские чтения. Мировоззрение современного общества в фокусе научного знания и практики. Материалы постоянно действующей Всерос. междисциплинарной науч. конф. Ч.2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004.— С.127-128.

6. Денисова, О.Н. Аэрозольное загрязнение свинцом фотосинтезирующих органов пихты сибирской: экологический аспект / О.Н. Денисова, Р.И. Винокурова // Восьмые Вавиловские чтения. Мировоззрение современного общества в фокусе научного знания и практики. Материалы постоянно действующей Всерос. междисциплинарной науч. конф. Ч.2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004.— С.130-132.

7. Денисова, О.Н. Накопление свинца в хвое ели обыкновенной и пихты сибирской в условиях аэрозольного загрязнения / О.Н. Денисова, Р.И. Винокурова, Н.Д. Акмолина //Химия и лес: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – С.51–53.

8. Денисова, О.Н. Характер распределения свинца в почве и травянистых растениях вблизи автомагистралей / О.Н. Денисова, Р.И. Винокурова, М.Ю. Коржавина //Химия и лес: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – С.53–55.

9. Денисова, О.Н. О некоторых особенностях аккумуляции свинца и цинка травянистыми лесными растениями в условиях аэрозольного загрязнения / О.Н. Денисова, Р.И. Винокурова // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Современные проблемы аграрной науки и пути их решения. Т.2. – Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2005. — С. 149-153.

10. Денисова, О.Н. Содержание свинца в почве и фотосинтезирующих органах растений придорожной полосы в условиях аэрозольного загрязнения выхлопными газами автотранспорта / О.Н. Денисова, Р.И. Винокурова, А.И. Винокуров, В.З. Латыпова // Вестник Татарстанского отделения Российской Экологической Академии. – Казань, 2005. – № 2 (24). – С. 62-64.